

Верхорубов В. С., Невежин С. В., Коробов Ю. С.
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

Щицын Ю. Д., Неулыбин С. Д.
ПНИПУ, г. Пермь

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В КОМПОЗИЦИИ «МЕТАЛЛИЗАЦИОННОЕ ПОКРЫТИЕ – ОСНОВА» ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СЖАТОЙ ДУГИ

Предпринята попытка описать распределение температур в композиционном материале «металлизационное покрытие – основа» под воздействием высококонцентрированного плазменного источника нагрева, с целью оптимизации параметров режима плазменной обработки пористого металлизационного покрытия на основе железа. Теплофизические характеристики покрытия определялись из его химического состава. Уравнение теплопроводности решалось методом прогонки в пакете MathCad 14. В результате расчетов получены графики распределения температуры в композиционном материале в зависимости от параметров режима обработки и пористости покрытия.

Ключевые слова: *MathCad, моделирование, уравнение теплопроводности, прогонка, плазменная обработка, металлизационное покрытие, пористость.*

Структурные дефекты газотермических покрытий, связанные с условиями их формирования, не только ухудшают коррозионную стойкость системы «покрытие – основа», но также снижают и механические свойства покрытий.

В настоящее время для улучшения свойств напыленных покрытий чаще всего применяют высококонцентрированные источники нагрева [1–4]. Однако большинство работ по данному направлению посвящены обработке тонких покрытий из самофлюсующихся сплавов на основе никеля.

Для подбора оптимальных режимов поверхностной термообработки газотермических покрытий необходимо знать распределение температур в покрытии и подложке в процессе их нагрева. Определение температуры покрытия затрудняется его пористой структурой, и отсутствием данных о теплофизических характеристиках большинства применяемых для напыления материалов. Наибольший интерес представляет знание температуры границы «покрытие – подложка», так как большой перепад температур в данной зоне может привести к отслоению покрытия.

Таким образом, цель данной работы заключается в определении распределения температур в композиционном материале «металлическое покрытие – основа», для оптимизации режимов плазменной обработки металлизационных покрытий на основе железа.

Для решения поставленной задачи построим математическую модель процесса распределения температур в композиционном материале на основе решения краевой задачи теплопроводности, в пакете MathCad 14.

Композицию «покрытие – основа» будем считать пластиной с переменными по толщине теплофизическими свойствами (рис. 1).

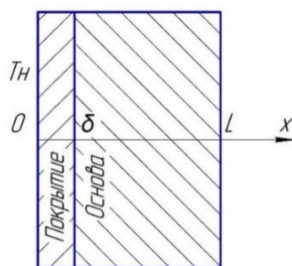


Рис. 1. Схема задачи

Математическая постановка задачи теплопроводности для одномерного поля температур имеет вид:

$$\begin{cases} c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, & 0 < x < \delta \\ c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, & \delta < x < L \end{cases} \quad (1)$$

С учетом пористости покрытия эффективные объемная теплоёмкость и теплопроводность материала примут следующий вид [5]:

$$c\rho = c_m\rho_m(1 - P) + c_b\rho_bP;$$

$$\lambda = \lambda_m^{1-P}\lambda_b^P,$$

где $c_m\rho_m, c_b\rho_b$ – объёмная теплоёмкость материала покрытия и воздуха в порах;

λ_m, λ_b – теплопроводность материала покрытия и воздуха в порах;

P – пористость покрытия (в зависимости от напыляемого материала и параметров режима дуговой металлизации может изменяться от 2 до 12 % [6]).

Так как теплофизические характеристики металлизационных покрытий из порошковых проволок различного состава не известны, то их расчет будем выполнять в зависимости от процентного содержания легирующих элементов [7], по формулам (2), и будем считать их независимыми от температуры.

$$\lambda = \frac{1}{20}(11 - 7\sqrt[4]{\sigma}); c\rho = \frac{1}{10}(55 - 9\sqrt[4]{\sigma}), \quad (2)$$

где σ – коэффициент зависящий от содержания легирующих элементов

$$\sigma = \frac{1}{4}\left(\frac{1}{3}\left(C + \frac{1}{5}\left(Ni + Co + Cu + \frac{W}{3}\right)\right) + \frac{Mn}{14} + \frac{Si + Al}{7} + \frac{Cr + V + Ti}{13} + \frac{Mo + Nb + Zr}{24}\right)$$

Как показано в работе Стрельцова Ф. Н. [8], температура поверхности в зоне воздействия плазменной дуги сильно зависит от её параметров и изменяется в диапазоне от 2100 до 2500 °С. Таким образом, температуру поверхности покрытия под воздействием сжатой дуги будем считать известной и зададим её граничными условиями I рода.

$$T = T_w(x, t), \quad (3)$$

где $T_w(x, t)$ – температура на поверхности тела.

Для определения теплового взаимодействия между элементами с различными теплофизическими характеристиками на границе «покрытие – основа» зададим граничные условия IV рода [9].

$$\begin{cases} T_1(x, t) = T_2(x, t) \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \end{cases} \quad (4)$$

Будем считать, что обрабатываемая пластина с покрытием лежит на поверхности, плохо проводящей тепло, т. е. тепловой поток в ограждающую конструкцию равен нулю.

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0. \quad (5)$$

Решение поставленной задачи производилось методом конечных разностей. Для решения использовалась неявная разностная схема [9].

Покрытие толщиной 2 мм нанесено на подложку из низкоуглеродистой стали 20 толщиной 10 мм. В качестве материала для нанесения покрытия была использована порошковая проволока ППМ-6 системы легирования 150X8T2Ю [10].

Для определения влияния режимов плазменного воздействия и характеристик покрытия на распределение температур в композиции «покрытие – основа» проведен ряд экспериментов (табл. 1).

Таблица 1

Режимы экспериментов

№ опыта	Пористость, %	Температура подогрева, °С	Температура нагрева (режим обработки), °С	Время воздействия, с
1	P1 = 2; P2 = 6; P3 = 10	0	2300	6
2	6	Tr1 = 0; Tr2 = 150; Tr3 = 300	2300	6
3	6	0	Tn1 = 2100; Tn2 = 2300; Tn3 = 2500	6
4	6	0	2300	t1 = 2; t2 = 6; t3 = 10

Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 2.

На рис. 2 (а) видно, что чем больше пористость, тем меньше интенсивность нагрева покрытия, что связано с низкой теплопроводностью воздуха в порах. Таким образом, пористость покрытия значительно усложняет процесс плазменной обработки композиционного материала.

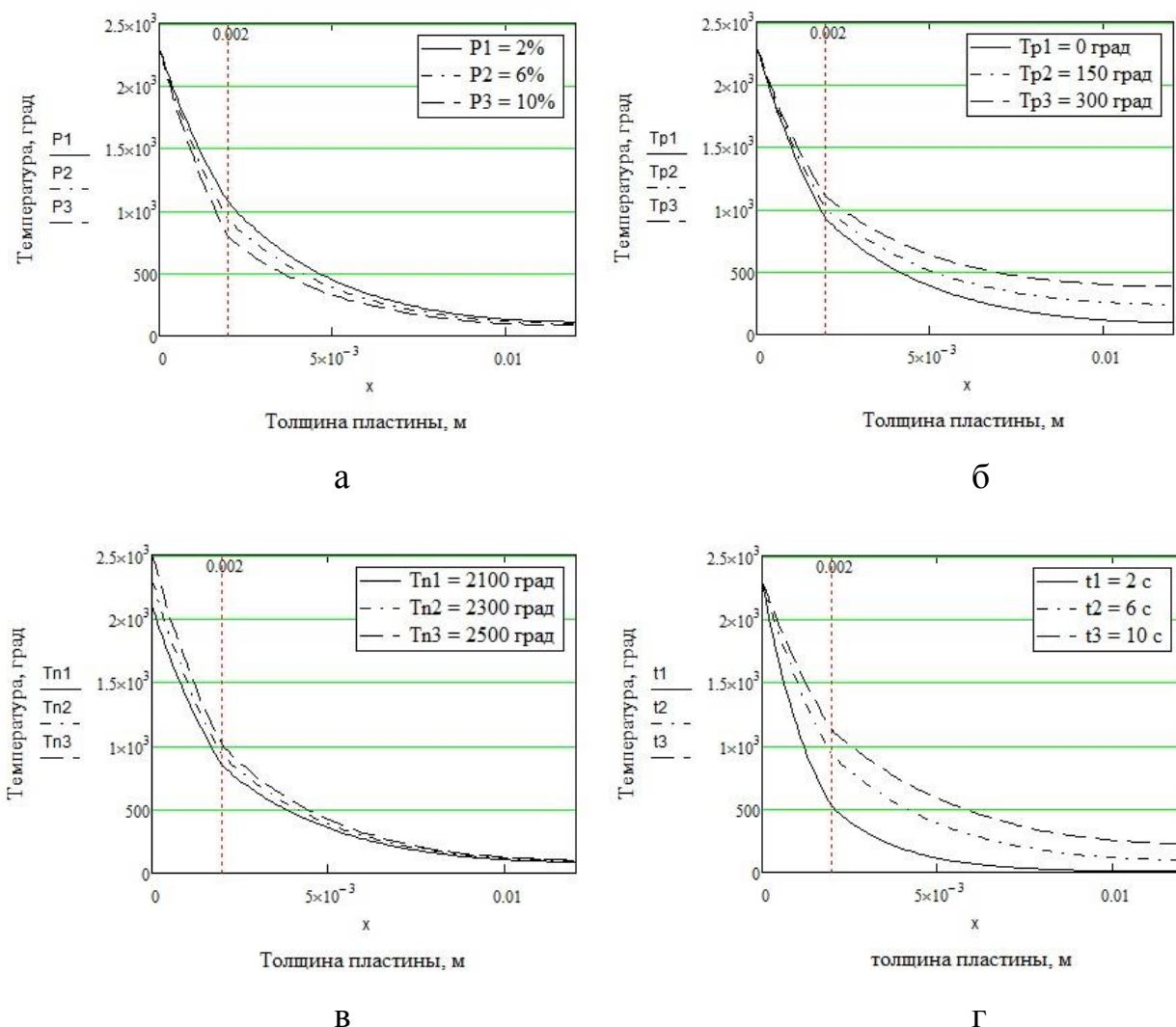


Рис. 2. Графики распределения температур в зависимости от: а – пористости покрытия, б – температуры подогрева, в – температуры нагрева, г – времени воздействия источника

Повышение температуры предварительного подогрева (рис. 2, б), температуры нагрева поверхности изделия (рис. 2, в), регулируемой параметрами режима сжатой дуги, и времени воздействия источника на поверхность (рис. 2, г) позволяют повысить температуру на границе «покрытие – основа». Таким образом, для предотвращения отслоения покрытия, вследствие больших перепадов температуры в переходной зоне, может потребоваться предварительный подогрев композиции, повышение тока сжатой дуги, а также снижение скорости плазменной обработки.

Заключение

Разработана математическая модель плазменной поверхностной обработки композиции «металлизационное покрытие – основа». Полученные в результате расчетов значения температурных полей позволяют дать рекомендации по оптимизации параметров плазменной обработки.

Литература

1. Sukhpal Singh Chatha, Hazoor S. Sidhu, Buta S. Sidhu. Role of post treatment in thermal spray coatings // National Conference on Advancements and Futuristic Trends in Mechanical and Materials Engineering (Oct. 7–8, 2011).
2. Исследование структуры и свойств никелевых порошковых покрытий после оплавления / В. А. Клеменов, В. Е. Панин, В. П. Безбородов. и др. // Физика и химия обработки материалов. 1997. № 6. С. 68–75.
3. Zhang S.H. Improvement on HVOF sprayed Diamalloy coatings by laser irradiation // Applied physics A. 2012. 108. P. 201–209.
4. Митрофанов А. А., Чашин Е. А., Балашова С. А. Обработка газотермических покрытий с использованием лазерного излучения // Вестник ИГЭУ. 2011. Вып. 1. С. 1–4.
5. Исследование теплового воздействия электронного пучка на композицию покрытие–основа / В. А. Клименов, Ж. Г. Ковалевская, А. Ю. Ерошенко, Д. В. Губарьков // Сварочное производство. 2002. С. 20–23.
6. Петров С. В., Сааков А. Г. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности. Киев : Топас, 2000. 220 с.
7. Конищев Б. П., Конищев К. Б. Расчет теплофизических коэффициентов сталей по их химическому составу и температурной зависимости теплофизических свойств цветных металлов // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева № 5 (102). 2013. С. 31–36.

8. Стрельцов Ф. Н., Потапов И. П. Температура поверхности металлургического расплава в зоне воздействия плазменной дуги // ФХОМ. 1974. № 6.

9. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие / Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.

10. Разработка порошковых проволок для получения покрытий, стойких к износу и газовой коррозии / Ю. С. Коробов, В. И. Шумяков, М. А. Филиппов, С. В. Невежин // Сварщик в России. 2012. № 4. С. 8–10.